

第三章 铝及铝合金材料

第一节 铝及铝合金材料应用领域

铝是地球上存储量最丰富的金属元素，自 1808 年被发现以来，已经广泛用于工业、农业、造船、航天、航空、轨道车辆等领域，铝元素主要用于下列领域：

电力传输工业

铝合金 散热器制造业

飞机、 航空、 航天设备

汽车工业

高速铁路轨道车辆、 地铁

造船

场馆建筑

门窗结构

金属铝及铝合金不同于钢材，当报废时，可再次熔化使用，对环境破坏最小，同时新型铝合金材料和热处理方法不断出现，铝合金材料强度越来越高，因此，铝合金的应用将越来越广泛。

第二节 铝及铝合金材料的物理特性

铝及铝合金具有如下物理特点：

-比重低（ 2.7g/cm^3 ），强度高（最高可达 450MPa ）

-耐大气腐蚀性比钢高

-在零度以下温度时，具有良好韧性

-非常适于铸造工艺

对于纯铝，其物理特性和钢相比具有如表 3-1 的内容：

表 3-1 铝与钢物理特性比较表

性能	Al	Fe
原子重量 (g/mol)	26.98	55.84

晶格	面心立方晶格	体心立方晶格
密度 (g/cm ³)	2.70	7.87
弹性模数 (MPa)	67. 10 ³	210. 10 ³
延展系数 (1/k)	24. 10 ⁻⁶	12. 10 ⁻⁶
Rp0.2 (MPa)	-10	-100
Rm (MPa)	-50	-200
比热 (J/kg. k)	-890	-460
熔化热 (J/g)	-390	-272
熔点 (°C)	660	1536
导热性 (W/m. k)	235	75
导电率 (m/Ω. mm ³)	38	-10
氧化物	Al ₂ O ₃	FeO/ Fe ₂ O ₃ / Fe ₃ O ₄
熔点 (°C)	2050	1400 / 1455 / 1600

对于铝及铝合金，物理特性如表 3-2。

表 3-2 铝及铝合金的物理特性表

材料缩写	导电性	热传导性	凝固范围
	20° C 条件下	20° C 条件下	° C
	S m/mm ² (单位)	W/cm K (单位)	
Al 99.5	33.5-35.5	2.26-2.29	659-658
AlMg 5	14.0-19.0	1.20-1.34	625-590
AlMg 4.5Mn	15.0-19.0	1.20-1.30	640-575
AlMgSi 0.5	26.0-35.0	2.00-2.40	650-615
AlMg 1 SiCu	23.0-26.0	1.63	640-595
AlZn 4.5 Mg 1	21.0-25.0	1.54-1.67	655-610
G-AlSi 12	17.0-26.0	1.30-1.90	580-570
G-AlSi 10 Mg	17.0-26.0	1.30-1.90	600-550

第三节 铝及铝合金材料的分类

一、铝及铝合金材料分类表

铝及铝合金材料按时效方式可分为可时效硬化铝合金、非时效硬化铝合金、铸造铝合金三类。非时效强化铝合金具有良好的耐腐蚀性，时效强化铝合金耐腐蚀性相对较差，铸造铝合金耐腐蚀性介于两者之间，图3-1表明了这三类铝合金之间的关系。

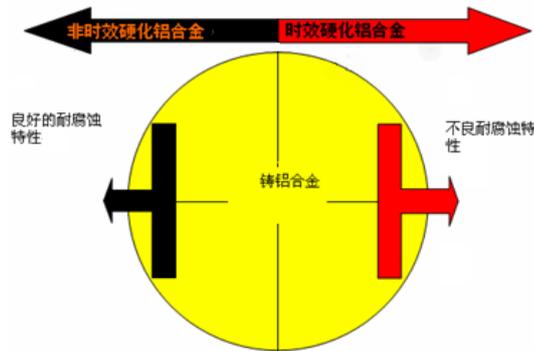


图3-1 铝合金材料分类表

二、时效硬化铝合金

时效硬化铝合金指的是含有镁、硅、锌或铜的铝合金通过退火、淬火和时效可以获得较高的抗拉强度的铝合金。这些材料可在室温状态下通过数天的时间自然时效，也可在80°C和160°C之间的温度下加快时效，例如60°C时，时效60小时，120°C时，时效24小时，可以得到相同的时效效果。人工时效还取决于焊件的大小，越大的焊件，时效时间越长。

由于焊接热输入的原因，时效硬化铝合金在热影响区损失了时效强度。焊接热影响区强度只有母材强度的60-70%，焊接时输入的热量越高，就有更多的焊接热量将改变原来的强度。后来的热处理可使它们返回到其原来的强度值。7系列铝合金自然时效明显，如AlZn 4.5 Mg在焊后通过简单的自然时效就可回复到其原来的强度值。在铝合金车辆工业，大部分使用的是时效强化型铝合金，由于焊接接头强度的降低，在设计结构上，在接头区要加强，以保证结构等强要求。

三、非时效硬化铝合金

非时效硬化铝合金在热处理后不硬化。它们从固溶处理中得到较高的强度（与纯铝相比）。Al-Mg和Al-Mn合金是典型的非时效强化铝合金。

四、铸造铝合金

通过向铝中添加硅可得到铸铝合金。铸铝合金在修补时，焊接材料通常使用与基材相同成分的母材进行这些修焊工作，特别是焊缝与母材有相同物理、化学特性要求时更是如此。用于这些合金的焊接材料不得有较高的含氢量。抛光后，焊缝的颜色要与母材相同。

通常焊缝在阳极氧化处理后将有一点稍微的不同着色。这在Si成分含量偏高时特别明显。

五、铝合金按数字系列分类说明

铝及铝合金也可按如下标准分为八类。这八类铝及铝合金的主要成份和性能特点如下：

1. 1000系列（工业用纯铝）

主要成分：Al（99%以上）。

特点：强度较低，但耐腐蚀性能、焊接工艺性及加工性很好，反光性高，是热和电的优良导体。

主要用途：家庭用品，机器零件装饰品、反射镜等。

2. 2000系列（铝铜合金）

主要合金成分：Cu（1.5%~6.0%），属时效硬化型铝合金。为加强其机械性能，进行淬火处理。

特点：耐腐蚀性差，焊接工艺性在铝合金中是最差的。但切削性比较好。

主要用途：主要用于飞机材料，铆钉结构件。

3. 3000系列（铝锰合金）

主要合金成分：Mn（1.0%~1.3%），经过冷轧加工制成各种材质的非时效硬化型铝合金。

特点：耐腐蚀性、加工性、焊接性和纯铝几乎一样，但是强度稍低（略高于纯铝）。

主要用途：主要用于建材的成形加工材料。常用于制做锅、水壶等容器，以及热交换器零部件等。

4. 4000系列（铝硅合金）

主要合金成分：Si（4.5%~13.5%），为非时效硬化铝合金。

特点：熔点低，可作焊接材料。

主要用途：常被用做焊条（电极焊丝）及硬钎焊用填料。常用于制做补强件，热交换器等。

5. 5000系列（铝镁合金）

主要合金成分：Mg（0.2~5.6%），只添加镁或同时还添加锰的铝合金为非时效硬化铝合金。

特点：耐海水腐蚀、焊接工艺、成形性好，强度比较高。

主要用途：最近多被用做焊接材料。常用在建筑、船舶车辆、机械零件、饮料罐等方面。

6. 6000系列（铝镁硅合金）

主要合金成分：Mg（0.45~1.5%），Si（0.2~1.2%），属时效硬化铝合金。

特点：耐腐蚀性好、易成形加工，挤压性能也不错，强度高。（劣于2000系列及7000系列）。

主要用途：结构材料、建筑用窗框、土木建筑用品，螺栓铆钉等。

7. 7000系列（铝锌镁合金）

主要合金成分：Zn(0.5~6.1%)，Mg(0.1~2.9%)，Cu(0.1~2.0%)，属高强度时效硬化铝合金。

特点：焊接工艺性、耐腐蚀性都不好，是现在铝合金中强度最高的材料，被称为超超硬铝，抗拉强度500Mpa。

主要用途：飞机结构材料，体育用品，车辆结构材料

8. 8000系列

备用系列

第四节 铝及铝合金材料的焊接特性

一、铝的熔点

纯铝的熔点大约是660℃，可焊接的商用铝合金的熔化温度大约在560℃-620℃。和钢、铜比较，钢的熔化温度大约在1540℃，铜的熔化温度大约在1080℃，铝在熔化过程中没有颜色变化，在焊接过程中容易产生焊穿。但是，可通过观察熔池判断是否接近铝的熔点。例如，当金属熔化时，TIG（钨极惰性气体保护氩弧焊）的熔池呈现光亮的外观，并且在电弧下面形成液体坑。铝和铝合金焊接过程中，会有如下焊接问题：

Al 99.5: 658 ° C ~~vs~~ 659 ° C （纯铝焊接，熔化区间非常小，气体来不及溢出）。

AlMg 4.5Mn: 575 ° C - 640 ° C（铝合金液态金属有更大的凝固范围，更长时间的凝固周期，可以使熔池更好地排气）。

二、热传导

铝及铝合金的导热系数大，导热速度是钢的3倍。这就意味着，对于焊接相同厚度的铝合金和钢，铝合金焊接需要的热量更大。对于厚板焊接通常采取焊前对焊接区进行预热，以减少热输入和降低热量的损失，并且当采用TIG焊工艺焊接时，采用预热的方式会得到更好的焊接效果。

三、热收缩和膨胀

熔化状态的铝合金在凝固结晶过程中，其体积大约减少6%，在此过程中所产生的收缩应力可能会导致焊接接头的变形。焊接输入的热量会使临近焊接区域的金属膨胀，热源离开时，

金属冷却产生收缩，加上熔化的金属在冷却过程中的收缩，可使焊接处产生拉应力，增加了裂纹的敏感性。焊接结构件在冷却过程中受到过度限制也可导致焊接裂纹产生。

焊接坡口的形状和焊缝数量是影响变形量的主要因素，双面对接焊的变形量通常比多焊道V型坡口焊的变形量要小得多。焊接速度也是控制变形的决定因素，焊接速度较低时，热输入量多会导致更大的膨胀，并且在冷却的过程中收缩也较大。热输入量不足会导致焊缝熔化不良，产生未焊透和未熔合等缺陷。焊前预热可降低产品的变形程度和产生裂纹的倾向，并能提高焊接速度。

四、焊接热输入对铝合金力学性能的影响

铝合金焊接后，热影响区会经历很大的热循环，导致热影响区强度退化，焊接接头强度只能达到母材的60-70%，因此铝合金焊后最薄弱的地方是焊接接头。

五、铝合金焊后残余应力处理的方法

铝的线膨胀系数是钢的3倍，这就意味着会有严重的扭曲变形和高的残余应力。另一方面，由于焊接热量的输入、焊接材料的厚度以及焊接设计等因素的影响，在铝合金焊接中所产生的焊接残余应力可能会非常大，这些应力可能会导致焊接件的结构尺寸不稳定。一个降低焊接残余应力的方法是敲击法（用1kg的圆头铜锤敲击焊缝金属），可降低残余应力水平。对于薄件一般不适合采用敲击法。对于薄工件，如果要求降低残余应力，建议采用热处理方法。加热到适当的温度，保温一段时间，使铝合金完全退火可消除残余应力。然而，只有铝合金为0状态（退火状态）时，完全退火消除残余应力的方法才可用。

对于铝镁合金（5000系列）可以通过低于340℃加热，达到完全退火温度，来降低残余应力。如果可行，可将焊接件整体放入加热炉中进行整体加热。采用局部加热消除残余应力的方法在某些情况下是有效的，但是需要试验后才可采用。

铝镁合金（5000系列）可进行充分的应力释放，大多数情况下，采用焊接后加热到230℃保温4h可获得很好效果。焊件在加热炉中的时间不能太长，相对来讲，冷却的速度不是非常重要。

对于热处理强化铝合金，采用退火处理来消除焊接残余应力会影响到焊接件的力学性能，某些合金可能会降低抗腐蚀性。

六、铝及铝合金表面氧化膜的影响

当铝和铝合金被暴露在空气中时，表面会迅速形成一层氧化膜，其熔点为2050℃，已远远超过铝合金的熔点。氧化膜的存在会影响铝合金的焊接质量，其危害主要有：

—氧化膜易吸附水分，焊接时容易产生气孔；

—氧化膜不导电，焊接时会使电弧不稳；

—氧化膜的密度大，焊接时破碎的氧化膜将沉积在熔池中形成夹杂；

—氧化膜熔点高，会阻碍填充金属和母材的熔合，易产生氧化物夹渣，因此焊接之前应严格清理工件表面的氧化膜，去除氧化膜的方法主要是机械打磨。

七、铝及铝合金材料中合金元素成份对性能及焊接的影响

镁Mg含量在0.3-7%之间时，在合金中起到增加强度和改善颗粒性的作用。

锰Mn含量在0.3-1.2%之间时，在合金中起耐海水腐蚀和增加强度的作用。

铜Cu含量在5%以下时，在合金中影响耐腐蚀性、提高淬火性。

硅Si含量一般控制在12%以下，能够起到降低铝合金熔点的作用。AlSi12通常被用做中间合金，属于低熔点共晶合金，常用作铝合金钎焊材料。硅的加入，也会带来金属纹理结构变粗，金属收缩变小，抗裂纹增强。

铝合金焊接中，焊接热输入会对铝合金材料产生退火作用，铝合金晶界低熔点物质会产生液化裂纹，对裂纹产生影响最大的是Si、Mg、Cu含量，图3-2说明了合金元素对铝合金焊接裂纹倾向的影响。

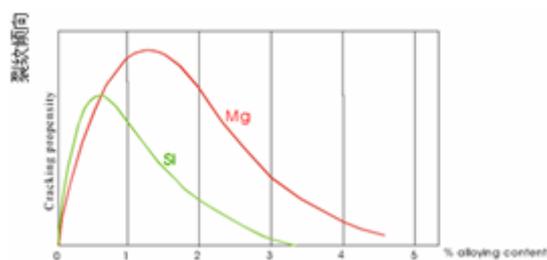


图 3-2 合金元素与裂纹关系图

图3-2指出铝合金焊接最危险的热裂纹敏感区间为Mg含量在0.5和2.5%之间、Si含量在0.3和1.5%之间时，裂纹倾向最大。

一种材料的相对裂纹敏感性受填充金属的影响。使用适当的母材/填充金属组合可降低裂纹的倾向。

在热影响区，纯铝不能形成脆化相，或时效后变硬。相反，对于加工硬化和时效硬化铝合金上，HAZ强度可能降低。表3-3说明了各类铝合金的可焊性。

表 3-3 铝及铝合金可焊性比较表

纯铝合金 Al 99.9; Al 99.5;	可焊性好
自然时效铝合金 AlMg 或 AlSi 合金	可焊性好
时效硬化铝合金 AlMgSi and AlZnMg	可焊性好

AlCu 合金	适用性有限
---------	-------